

基于土壤水分平衡的沙地草地 最优植被覆盖率的研究

高琼 董学军 梁宁

(中国科学院植物研究所, 北京, 100044)

Q948.155

A

摘要 本文从土壤水分平衡出发, 用动态仿真模型方法研究我国北方干旱半干旱沙地草地土壤水分平衡与立地条件, 如坡度、坡向、土壤物理性状及植被覆盖率之间的关系。有如下初步结论和论点产生: (1) 地表因植被的存在而形成的结皮对降水入渗到土壤中的阻滞作用几乎可以忽略。只有在坡度很大, 瞬间降水强度很大时, 结皮表面才可形成较大的径流; (2) 土壤水分的平衡随植被的覆盖率变化的情况(上升或下降)取决于立地条件的差异, 笼统地讲“植被覆盖率越高越好”、“植被覆盖率一概不宜太高”未免失之偏颇。

关键词: 土壤水分平衡, 沙地草地, 仿真模型。

最优植被覆盖率

A STUDY ON THE OPTIMAL VEGETATION COVERAGE FOR SANDY GRASSLAND IN NORTHERN CHINA BASED ON SOIL WATER BUDGET

Gao Qiong Dong Xuejun Liang Ning

(Institute of Botany, Academia Sinica Beijing, China, 100044)

Abstract A simple simulation model is developed for soil water dynamics on a sandy slope with different soil physical properties, different geographical locations, different aspects and slopes and different vegetation types and coverage. The model is parameterized with recent collected experiment data from the target area. Conclusions are: 1) the effect of resistance to penetration of precipitation to soil by the “shell” formed on the surface soil with organic matters and thus runoff in most cases are negligible compared to the evapotranspiration, except with a very steep hill; 2) variation of yearly average soil water content is affected by all the factors listed above. The effect of plant coverage is complicated by other factors such as topography (slope and aspect) and root resistance to percolation. Simple conclusion can not be drawn without specifications of all these parameters.

Key words: soil water budget, sandy grassland, simulation model.

* 收稿日期 1994 03 26, 修改稿收到日期: 1994 08 19。
国家自然科学基金资助项目。

1 背景情况

北方干旱,半干旱区植被发展的限制因子一般有水分和盐碱等。在毛乌素沙地(东经 $109^{\circ}20'$ 、北纬 $39^{\circ}20'$),由于沙对地表蒸发的阻滞作用,盐碱的问题不甚明显,而水分作为限制因子则非常突出。高效、合理的利用有限的自然降水,成为沙地植被发展及资源利用的关键。关于沙地植被与水分利用的研究,主要见文献[1-6]。

对沙地的管理,历来存在两种不同的观点:其一为“全固定”,即使地表植被的覆盖率达到 100%;其二为“半固定”,即将植被覆盖率控制在小于 100%的某一值的范围以内。全固定论者的观点是植物的根系有利于提高土壤的持水特性,因而有利于土壤水分的保持。而半固定论者的观点是植物的蒸腾耗水是最主要的作用,而地表蒸发极少。根据这一思想,有人^[7]提出了沙地植被管理的半固定原则。除了上述“蒸腾耗水”和“增加持水能力”以外,沙地植被还有第三种作用:植物的凋落物及其分解的有机物质在地表形成一个有机质层的结皮壳层,这种结皮有阻止降水的入渗,加强地表径流的作用。本文所针对的问题是,在不同的立地条件下(坡度、坡向、土壤导水特性、持水特性)、不同的植被类型和覆盖率对土壤水分的综合作用。因此,本文试图解释土壤水分的动态平衡与植被类型、植被覆盖率、土壤物理特性之间的定量关系。从这一关系出发,可以引伸出对给定的植被类型的基于土壤水分平衡的最优植被种植、栽培方案。

沙地草地生态系统模型的工作在近年也有所进展。但这些多变量、多参数的复杂系统模型终因沙地立地条件和植被的复杂性及定量信息的缺乏,而难以在短期内取得准确的分析结果。本文将以简单的水分平衡模型为基本手段,力求利用现有的沙地植物生理生态研究资料来完成模型的参数化工作,使分析结果具有较高的准确程度。

2 沙地草地土壤水分平衡模型的建立

考虑一坡向为 A 、坡度为 α 的坡面,其地表的植被覆盖率为 C ,植被覆盖率为 1.0 时的叶面积指数为 $L_m(t)$, t 为时间。这样地表的表观叶面积指数 $L_w(t) = CL_m(t)$ 。定义土壤表面的入渗系数 λ 为降水渗入土壤的速率与降水速率之比,并以 λ_0 、 λ_1 分别表示植被覆盖部分地表和无植被覆盖部分地表的入渗系数。 λ_0 、 λ_1 除与土壤的物理特性有关以外,还与坡度有关,在 $0-\pi/2$ 范围内,坡度越大,入渗的部分就越小,而形成径流的可能性则越大。更具体地说,由于入渗是由于重力的作用的结果。 λ_0 和 λ_1 可以写成重力

势的函数。由于植被覆盖部分的地表结皮的作用,因此, λ_0 除描述了植被对入渗的阻滞作用外,更主要的是反映了植被覆盖部分的地表结皮对入渗的阻常作用。所以,一般应有 $\lambda_0 < \lambda_1$ 。以 $P(t)$ 和 $E(t)$ 分别表示降水和叶面积指数为 1 时的可能蒸腾强度,实际蒸腾强度为 $CL_m(t)E(t)$ 。由于坡度的作用,地下潜流可表示为土壤水分 W (地表 2 m 深度以内的土壤水分),由于植物根系的持水作用所形成的阻滞系数 r ,植被盖度 C 及坡度 α 的函数。即 $g(C, r, W,$

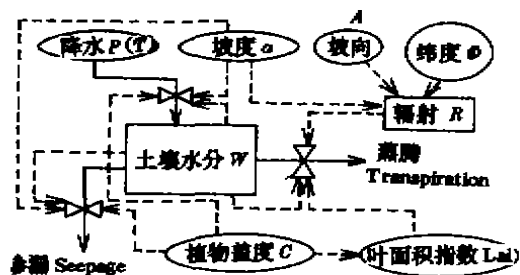


图 1 沙地草地土壤水分平衡示意

Fig. 1 Soil water model for sandy grassland

a)。在忽略地表蒸发的情况下,可以写出瞬时的土壤水分动态方程为

$$W = P(t)[\lambda_v(a)c + \lambda_s(a)(1 - c)] - CL_m(t)E(t) - g(c, r, W, a) \quad (1)$$

模型的结构如图 1 所示。图中虚线箭头代表信息流动方向,而实线箭头代表物质或能量流动方向。土壤水分 W 有下界 $W_{\min}$,由土壤最小持水量所决定;在上界 $W_{\max}$ 由土壤的饱和含水量所决定。以下将就模型中的各函数和参数的确定展开讨论。

2.1 入渗系数 λ_v, λ_s 的确定

入渗系数主要由土壤的导水特性和坡度所确定。考虑坡度为 0 时的无限薄的土壤表层的入渗情况,可以写出

$$\lambda_v(0) = \begin{cases} 1, & P(t) < K_{ov} \\ K_{ov}/P(t), & P(t) \geq K_{ov} \end{cases} \quad (2)$$

式中 K_{ov} 为植被覆盖地表所形成结层后的饱和导水率。

假定无植被覆盖地表与植被覆盖部分均匀镶嵌,则当 $P(t) > K_{ov}$ 时,植被覆盖部分有径流产生。这部分径流与 $P(t)$ 相加,形成无植被部分的有效降水。所以,

$$\lambda_s(0) = \begin{cases} 1, & P(t) < (1 - C)K_{ov} + CK_{ov} \\ K_{ov}/P(t), & P(t) \geq (1 - C)K_{ov} + CK_{ov} \end{cases} \quad (3)$$

根据对沙地草地土壤的导水实测的结果,可以初步确定, K_{ov} 在 1000 mm/月, $K_{os} = 70$ cm/月左右。在坡度不为 0 的情况下, $\lambda_v(a) = \lambda_v(0)\cos(a)$, $\lambda_s(a) = \lambda_s(0)\cos(a)$ 。因此,在坡度为零的情况下,只有在降水的瞬时速率大于 $(1 - C)K_{ov} + K_{ov}$ 时,地表才可能有径流产生。当植被覆盖率为 1.0 时,瞬时降水速率超过 1000 mm/月,当植被覆盖率为 0.5 时,瞬时降水速率须大于 5350 mm/月才可能有径流产生。在植被覆盖率一般较低,土壤沙性较重,而降水又是如此之少的毛乌素沙地来说,除在坡度较大的梁地上外,形成径流的可能极小。由此可见,沙地因结皮所产生的径流量在全年降雨中所占的比重极小。只有在某些坡度较大的硬梁或土质具较大粘性的软梁地上(此时 K_{ov} 较小),地表径流才占有相当的比重。

2.2 叶面积指数 $L_m(t)$

根据大多数沙地草地的植物物候,植物叶面积指数在 5 月初开始有明显上升,至 6 月中达到最大值,并一直维持到 9 月初。此后叶面积指数下降,至 10 月初活叶面积指数降至近似为 E_o 。据此可写 $L_m(t)$ 的函数形式 $L_m(t) = LoV(t)$ 。其中 Lo 是与植被类型(或群落类型)有关的常数,而 $V(t)$ 为峰值为 1 的梯形函数,即

$$V(t) = \begin{cases} 0, & t < 4.0 \\ (t - 4)/1.5, & 4.0 \leq t \leq 5.5 \\ 1, & 5.5 \leq t < 8.0 \\ 0, & 8.0 \leq t \leq 12.0 \end{cases} \quad (4)$$

根据实测得的毛乌素当地的蒙古岩黄芪的叶面积指数,可算出 Lo 在 1.966—3.30 间。

2.3 潜在蒸腾 $E(t)$

考虑坡度为 a ,坡向为 A 的坡面上的植物蒸腾耗水情况。可将 $E(t)$ 写成 $E_o\epsilon(t)$,其中 E_o 为常数, $\epsilon(t)$ 为极大值 1 的与辐射成正比的函数。当太阳高度角为 h 、方位角为 $\hat{E}a$ 时(方位角 a 、坡向 A 均以正南为 0 度,地图平面上顺时针方向为正),

$$\epsilon(t) = \max[0, \cos(h)\sin(a)\cos(a - A) + \sin(h)\cos(a)] \quad (5)$$

其中, h 和 a 与地理纬度 Φ 、太阳赤纬 δ 和时角 Ω 有关。 h, a 可以用普通天文公式求出。

根据实测的蒙古岩黄芪的分月蒸腾数据,用数值积分方法对方程的蒸腾项进行以月为区间内的积分(步长为 2h),即求取

$$\int_{t_m}^{t_{m+1}} CL_m E(t) dt = CL_c E_0 \int_{t_m}^{t_{m+1}} V(t) \varepsilon(t) dt \quad (5)$$

式中 $[t_m, t_{m+1}]$ 表示一个月以内的积分区间。根据实测的蒸腾值,算得 E_0 在 10 cm/月左右。

2.4 潜流渗漏函数 $g(C, r, W, a)$

潜在渗漏函数是沙坡的主要土壤水分损失之一。 g 应体现:1) 土壤的最小持水量条件,即当土壤水分小于田间持水量(Field Capacity)时,潜流为 0; 2) 最大潜流速率条件,即当潜流速率上升至某一特定值时,边界条件限制了潜流速率的进一步增加; 3) 根系的持水作用效应,即植被覆盖率越高,土壤中根系越多,持水能力越强的特点。由此取 g 为如下形式:

$$g(C, r, W, a) = \begin{cases} 0, & W < W_l \\ g_0(1 - rC)(W - W_l)\sin(a), & W_l \leq W \leq W_k \end{cases} \quad (6)$$

式中 g_0, W_l, W_k 为常数, W_l 是沙地的田间持水量。沙地土壤的田间持水量一般很小,以体积含水率 0.05 计,可以近似取 $W_l = 10$ cm。由于缺乏数据, W_k 可认为等于其最大的持水量,即饱和含水量。以 0.15 计,在地表 2 m 以内的饱和含水量是 30 cm。 g_0 的确定可以考虑在一个生长周期内,坡度适中(30°左右)而植被的覆盖率为 0 时,系统处于稳定状态,年降水被全部转换为潜流(忽略沙地蒸发),这样估计得到的 g_0 近似等于 0.4。

植被阻滞系数 r 是最不易确定的一个系数。可以这样考虑:当植被类型为一定时, C 在 $[0, 1]$ 区间变化时,最大、最小可能的持水效应 rC 也应在 $[0, 1]$ 区间。这样 r 也应在 $[0, 1]$ 区间。 r 取 0 值表示植被完全不能帮助土壤持水,反之 $r = 1$ 则说明当植被的覆盖率为 1 时,植被完全抑制了潜流的产生。这两种情况都不符合实际的极端情形。

2.5 降水函数 $P(t)$

降水是生态学研究随机性最强的量之一。但由于本文只关心多年的平均效应,故拟以近似的方式来确定降水:假定降水完全集中于 6、7、8 三个月,以 $P(t) = P_0 \Psi(t)$ 来表示(P_0 为常数),且

$$\Psi(t) = \begin{cases} 0, & t < 5.0 \\ (t - 5.0)/2.0, & 5.0 \leq t < 7.0 \\ 8 - t, & 7.0 \leq t < 8.0 \\ 0, & t \geq 8.0 \end{cases} \quad (7)$$

以年降水为 350 mm 计,可推算得 $P_0 = 23.3$ cm/月。

2.6 土壤水分的上下界 $W_{\max}$ 和 $W_{\min}$

假定考虑的是地表 2 m 的土壤层内的土壤水分的含量,且最小的含水率为 1.5%,饱和含水率为 15%,这样有 $W_k = W_{\max} = 30$ cm,而 $W_{\min} = 3$ cm。

3 模型的求解结果及讨论

将(2)~(7)式代入(1)式,以 2h 为步长进行数值积分运算,以土壤水分进入稳定状态(一年中土壤水分收支平衡)作为停止运算标准。以表 1 中的参数水平选择作为不同的运行参数组合,所得结果如图 2—5 所示。各图中纵轴表示非量纲化了的稳定状态下的年平均土壤水分,横轴表示植被的覆盖率, T 表示年周期。

表 1 模型运行参数的选择

Table1 Selection of parameters for model

固定参数	$r=0.64$	$r=0.64$	$r=0.65$	$L_0=2.25$
Preslected Parameters	$K_{ov}=70.0$	$L_0=2.25$	$L_0=2.25$	$a=45.0$
	$a=45$	$K_{ov}=70.0$	$K_{ov}=70.0$	$A=0.0$
	$A=0.0$	$A=0$	$a=45.0$	$K_{ov}=70.0$
	$\Phi=38.0$	$\Phi=38.0$	$\Phi=38.0$	$\Phi=38.0$
交叉参数	$L_0=1.25, 1.75,$	$a=7.5, 22.5,$	$A=0.0, 45.0$	$r=0.16, 0.32$
Cross-varied Parameters	$2.25, 2.75$	$45.0, 60.0$	$90.0, 180.0$	$0.48, 0.64$
	$3.0, 3.25$	$67.5, 75.0$	$225.0, 315.0$	$0.72, 0.80$
选择参数 C	0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9			
Free parameters				

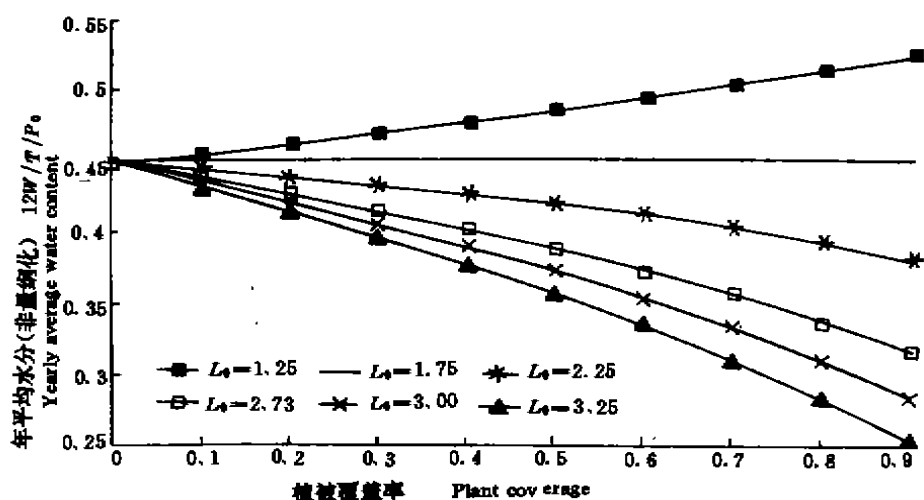


图 2 年平均土壤水分随植被覆盖率和最大叶面积指数的变化(阻滞系数=0.64,坡度=45°,坡向=0)

Fig. 2 Yearly average soil water content as a function of plant coverage and peak leaf area index with resistance coefficient=0.64, slope=45 degrees and aspect=0

图 2 是平均土壤水分与 L_0 和 C 之间的关系。当 L_0 较小时,群落的叶面积指数较小,根系的持水作用有可能超过蒸腾耗水作用,土壤水分呈随植被覆盖率增加而增加的趋势。当然本文未考虑根系与地表叶面积指数之间的关系。当叶面积的峰值 L_0 超过某一临界值时,蒸腾作用超过根系的持水作用,土壤水分呈随植被覆盖率下降而下降的趋势;当 L_0 近似等于 1.75 左右时,蒸腾耗水与持水作用近于相抵,土壤水分对植被覆盖率变化不太敏感。因此即使是仅从土壤水分平衡来考虑,“植被覆盖率愈大愈好”的论点只适用于那些蒸腾耗水极少、根系发达又密集,且有较强的辅助持水能力的植物。应该说,具体情形下的植被覆盖率应该依具体的立地条件而论。对叶面积较小,而根系发达的植物,覆盖率可高一些。反之,对叶面积指数大的植物,种植密度宜低一些。从图 2 对给定的土壤水分平衡中可以判读出不同的叶面积指数的植被所宜选取的植被覆盖率。

图 3 表示了稳定年平均土壤水分与植被覆盖率和坡度之间的关系。在坡向为 0(正南坡)情况下,土壤水分基本上呈与植被覆盖率下降的趋势。比较有趣的是当坡度为 22.5° 左右时,土壤水分有峰值出现。

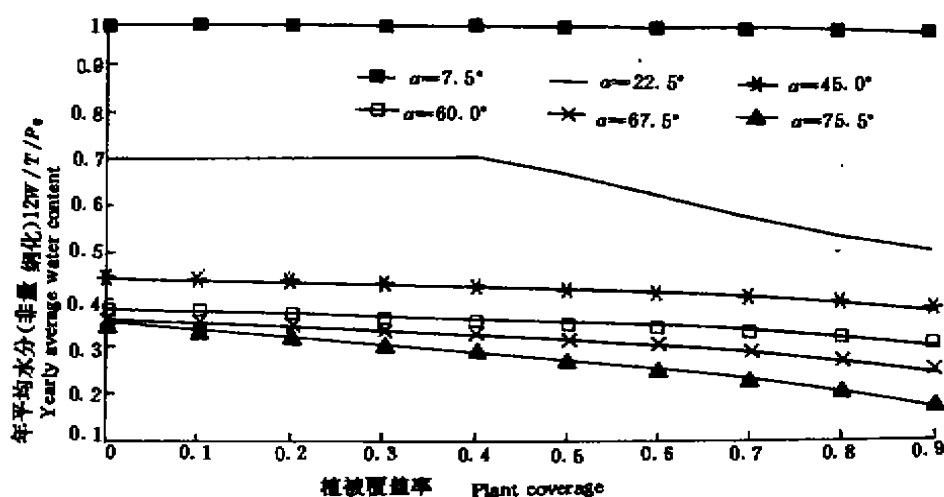


图 3 年平均土壤水分与植被覆盖率和坡度的关系(阻滞系数=0.64,最大叶面积指数=2.25,坡向=0)

Fig. 3 Yearly average soil water content as a function of plant coverage and slope with resistance coefficient=0.64, $L_0=2.25$ and aspect=0

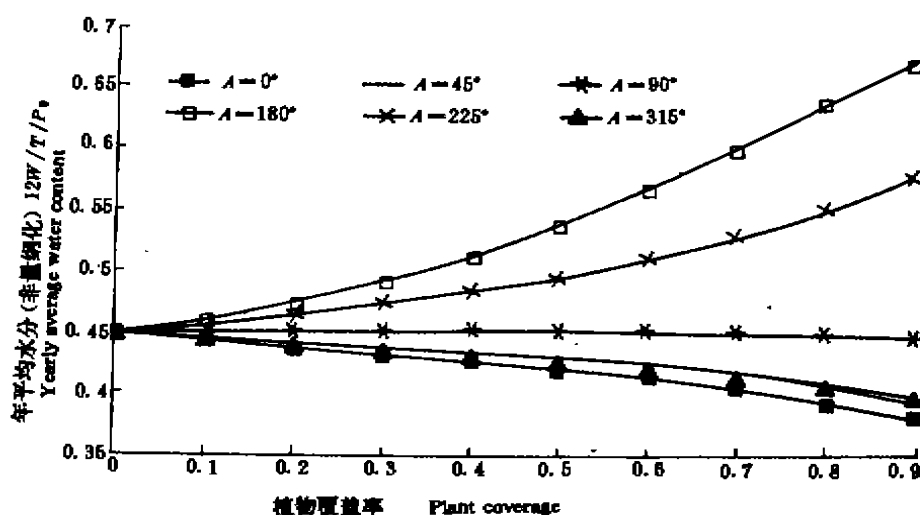


图 4 年平均土壤水分与植被覆盖率和坡向的关系(阻滞系数=0.64,最大叶面积指数=2.25,坡度=45°)

Fig. 4 Yearly average soil water content as a function of plant coverage and aspect of the slope with resistance coefficient=0.64, $L_0=2.25$ and slope=45° degrees

土壤水分与坡向和植被覆盖率之间的关系可从图 4 看出。在坡度为 45° 时, 阳坡土壤水分随植被覆盖率递减, 而阴坡随植被覆盖率递增; 坡向为东北或西北时, 植被覆盖率对土壤水分的作用不明显。

图 5 所示为阻滞系数的作用。在适中的阻滞作用下, 土壤水分对植被覆盖变化的响应仍是下降的趋势。只有在 $r > 0.75$ 以上时, 阻滞潜流的作用才超过了植被的蒸腾作用。因植被根系的存在而抑制了 75% 以上的光沙坡上的潜流, 直观感觉是不符合实际的。因此, 在此提出一假说: 即对一般情况而言, 植被的蒸腾作用超过根系的持水作用。尚待进一步验证。

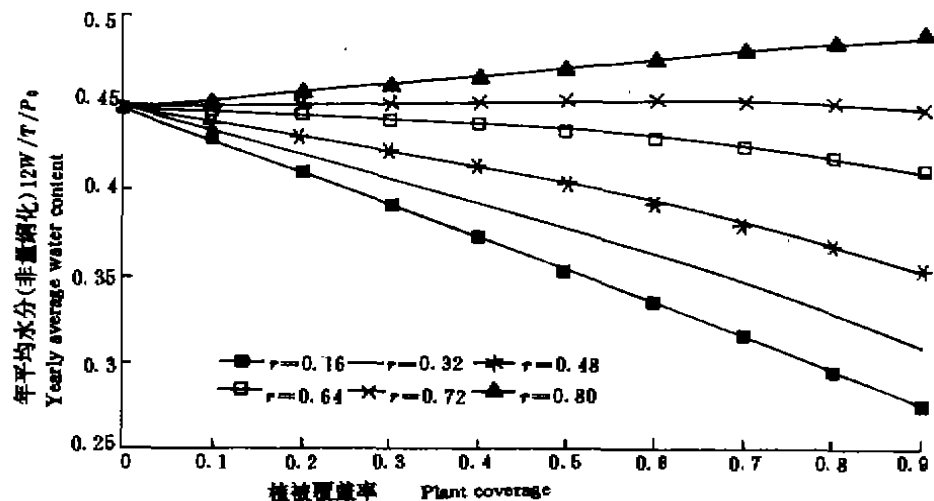


图 5 年平均土壤水分与植被覆盖率和阻滞系数的关系 (坡度 = 45° , 最大叶面积指数 = 2.25, 坡向 = 0)

Fig. 6 Yearly average soil water content as a function of plant coverage and resistance coefficient
slope = 45° degrees, $L_c = 2.25$ and aspect = 0

笔者做过关于 $K_{0.0}$ 的敏感度分析, 结论是在 $K_{0.0} = 70.0 \text{ cm/月}$ 左右, 土壤水分对 $K_{0.0}$ 的变化不敏感。关键是 $K_{0.0}$ 远大于 P_0 , 形成径流的可能性极小。只有在特大暴雨的情形时, 才有形成径流的可能。所以, 结论是地表结皮对降水入渗而形成土壤水分的过程影响一般不大。

参 考 文 献

- 1 李 博. 内蒙古鄂尔多斯高原自然资源与环境的研究. 北京: 科学出版社, 1990, 23—52, 297—307
- 2 廖汝堂, 张文军. 毛乌素流动沙地适宜植被覆盖率的研究, 1. 沙生植物的分布及盖度状况; 2. 沙生植物的水分关系与适宜种植规模, 见: 王家祥主编. 毛乌素沙地开发整治中心研究论文集第一卷. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 1992, 84—97
- 3 铃木雅一. 毛乌素沙地地下水变化和蒸散量. 见: 王家祥主编. 毛乌素沙地开发整治中心研究论文集第一卷. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 1992, 120—125
- 4 小林哲夫, 松田昭美, 神木近男. 毛乌素沙丘表面的蒸发速率. 见: 王家祥主编. 毛乌素沙地开发整治中心研究论文集第一卷. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 1992, 127—130
- 5 姚洪林, 和子杰, 高换树, 韩太平. 提高沙地含水量的研究. 见: 王家祥主编. 毛乌素沙地开发整治中心研究论文集第一卷. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 1992, 131—136
- 6 高 琼. 水分为限制因子的草地优化收获理论的研究. 植物生态学与地植物学学报, 1992, 16(2): 118—125
- 7 张新时. 毛乌素沙地的生态背景及其草地建设的原则与优化模式. 植物生态学报, 1994, 18(1): 1—16